

# **Identificación de fuentes de ruido en los sectores automovilístico y de la construcción.**

José A. Ballesteros\*, Marcos D. Fernández\*, Samuel Quintana\*

**Resumen** La identificación de fuentes de ruido es uno de los temas de actualidad en el campo de la acústica, ya que nos permite conocer las causas de la generación de ruido y atajar el problema en su raíz, actuando sobre aquellas zonas en las que la emisión de ruido es mayor. En el presente artículo se muestra la investigación sobre identificación de fuentes de ruido llevada a cabo en dos sectores distintos: el sector automovilístico y el sector de la construcción. En el sector automovilístico se han llevado a cabo dos investigaciones diferenciadas. En primer lugar, se ha evaluado la forma en que las distintas fuentes de ruido del vehículo parado (motor y tubo de escape) influyen en el ruido percibido por el conductor y los viandantes, identificando las fuentes más molestas y cuyo nivel de ruido debería reducirse. Por otro lado, se han identificado las fuentes que mayor nivel de ruido generan cuando el vehículo circula a velocidad constante, observándose que la mayor radiación se produce en la interacción de las ruedas con el asfalto, siendo el siguiente paso el diseño de neumáticos y pavimentos que, cumpliendo las exigencias de seguridad, contribuyan a una menor generación de ruido, que redunde en un mayor confort acústico en nuestras ciudades. Dentro del sector de la construcción, se han utilizado distintas técnicas que nos permiten identificar aquellas partes de los paramentos que poseen un menor aislamiento acústico, localizando las partes de los mismos (juntas, ventanas, puertas...) sobre las que deberíamos actuar si queremos mejorar el aislamiento acústico en los edificios.

---

\*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones. Escuela Politécnica de Cuenca, Campus Universitario s/n, 16071 Cuenca, Spain, [josea.ballesteros@uclm.es](mailto:josea.ballesteros@uclm.es), [Marcos.Fernandez@uclm.es](mailto:Marcos.Fernandez@uclm.es) y [Samuel.Quintana@uclm.es](mailto:Samuel.Quintana@uclm.es)

## **Introducción**

El ruido de tráfico es una de las fuentes de ruido más importantes en los países industrializados. Hoy en día, aunque los límites respecto a ruido de tráfico han sido reducidos por la Unión Europea, los niveles de ruido de tráfico no han descendido, debido al incremento del tráfico y la extensa red de carreteras.

Cuando un fabricante de vehículos tiene dificultades para aprobar su modelo, es importante conocer las contribuciones relativas de cada una de las fuentes al ruido total generado por el vehículo, para realizar un control de ruido efectivo sobre las fuentes que presenten una mayor emisión.

Los procesos de homologación basados en test de aceleración han reducido el ruido del motor y del escape en los coches, sin embargo, este procedimiento ha tenido una menor repercusión en el ruido de rodadura, lo que ha provocado que este sea la principal fuente de ruido cuando el coche está en movimiento.

Respecto al sector de la construcción, son numerosos los problemas de aislamiento que existen en negocios y viviendas, por lo que resulta de utilidad, no sólo conocer el valor del aislamiento de un determinado paramento, sino identificar aquellas partes del mismo que poseen un debilitamiento, con el fin de conocer dónde debemos actuar para mejorarlo.

Teniendo en cuenta lo anterior, las técnicas de identificación de fuentes resultan de gran utilidad, ya que nos permiten identificar aquellos puntos o fuentes de ruido que resultan problemáticos y actuar sobre la raíz del problema.

## **Identificación de fuentes sonoras en el sector automovilístico**

La mejora ha estado siempre ligada al diseño y desarrollo de automóviles, además, en las últimas décadas, esta mejora ha ganado importancia debido a la legislación, que limita los niveles de ruido emitidos por los vehículos (directiva 70/157/EEC), y a la diferenciación y mejora de los vehículos respecto a la competencia.

La categorización de fuentes de ruido en el sector automovilístico es necesaria para conseguir que el nivel de ruido sea el menor posible. Esto implica conocer las fuentes de ruido con la mayor contribución al nivel de ruido total, para poder actuar sobre ellas.

En relación con el ruido emitido por los coches, se han realizado dos tipos de estudios. En el primero de ellos, se han llevado a cabo varios experimentos, evaluando la relación que existe entre el ruido emitido por diferentes partes del coche a ralentí y el ruido percibido por una persona situada dentro o fuera del coche. En el segundo de los estudios, se han identificado y evaluado las principales fuentes de ruido presentes cuando el coche se desplaza a velocidad constante.

### ***Evaluación de las fuentes sonoras con el coche parado***

El primer paso en la investigación consistió en la evaluación de la relación entre el ruido emitido por un coche parado al ralentí con el percibido por el conductor del mismo y los viandantes. Para ello, se eligió la técnica de intensidad selectiva, que es una técnica efectiva para determinar las causas internas del ruido emitido.

El principio en el que se basa esta técnica consiste en calcular qué parte de la intensidad medida en un punto está relacionada con un transductor de referencia (micrófono, acelerómetro, hidrófono, etc.) localizado en la que se sospecha es la causa del ruido emitido. Si la hipótesis es correcta, el espectro de la intensidad y la intensidad selectiva estarán relacionados.

En (Ballesteros, Fernández y Ballesteros, 2014) se definieron tres experimentos distintos para evaluar el ruido producido por un coche al ralentí. Como consideraciones iniciales y comunes a los tres experimentos, se puede destacar que se ha utilizado un coche de gama media, situado en campo libre sobre una superficie reflectante y a más de 3m de cualquier obstáculo. El coche estuvo funcionando a ralentí, lo que nos asegura estacionaridad del ruido emitido y repetibilidad de las medidas.

#### ***Experimento 1: Coherencia entre la intensidad sonora en el asiento del conductor y micrófonos externos.***

Para determinar la relación entre la intensidad medida en la posición del conductor, y la que llega a distintos micrófonos situados en el exterior, se tomaron como referencia las normas UNE-EN ISO 11205 e ISO 5130. De

esta forma, se localizó la sonda de intensidad en tres ejes, tal y como se muestra en la figura 1, y se midió la intensidad sonora durante 15s.

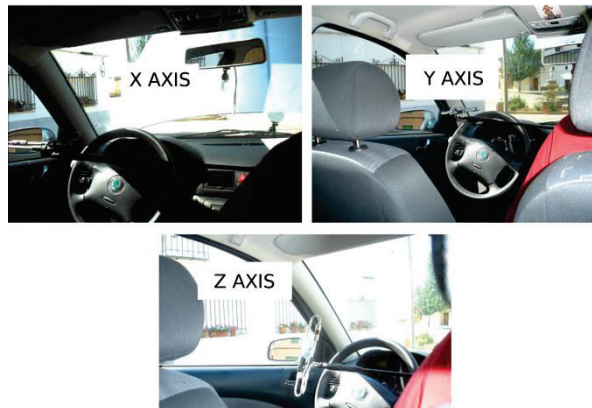


Figura 1. Colocación de la sonda de intensidad en cada uno de los ejes.

Como micrófonos de referencia se han utilizado cuatro micrófonos situados en el exterior del coche, tal y como se muestra en la figura 2. El primer punto se localiza en el tubo de escape, a la altura del orificio de salida de gases, a una distancia de 0,5m y con un ángulo de  $45^\circ \pm 10^\circ$ . Otros dos micrófonos de referencia se han situado a cada lado del eje frontal del coche, a una distancia de 0,5m. El último punto se ha situado en el motor.

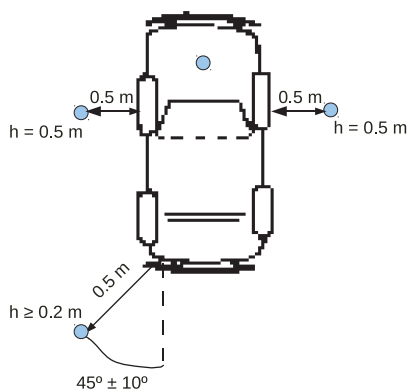


Figura 2. Localización de los puntos de referencia.

Tras analizar la coherencia entre la intensidad medida en cada eje en la posición del conductor y cada uno de los cuatro micrófonos de referencia, se observó lo siguiente:

- Para el eje x, la mayor contribución provenía del motor, bien debida a su propia emisión o a las emisiones laterales.
- Para el eje y, la mayor contribución proviene nuevamente del motor, siendo él mismo la fuente de mayor coherencia, y en otras bandas frecuenciales uno de sus laterales.
- Para el eje z, la fuente con una mayor coherencia en todas las bandas frecuenciales era el tubo de escape.
- Como caso excepcional, en la banda de 250Hz, todas las fuentes sonoras aparecieron como coherentes.

Por otro lado, no resultó aconsejable unificar los resultados de los tres ejes como un nivel de intensidad selectiva conjunto, ya que el factor cuadrático que hay que introducir en la ecuación hace que se pierda la información de sentido de la intensidad dada por el signo.

### ***Experimento 2: Coherencia entre la intensidad sonora en puntos en el exterior del coche y diferentes posiciones de un HATS.***

En este caso, se ha localizado la sonda de intensidad en los mismos puntos en el exterior del coche en los que localizábamos las señales de referencia en el experimento anterior. Ahora, como señales de referencia, se han utilizado los micrófonos situados en los dos oídos de un HATS (Head And Torso Simulator – Simulador de cabeza y torso), para obtener una mayor aproximación a lo que escucharía una persona situada en el mismo punto. El HATS se ha situado en la posición del conductor y a 0,5m a cada lado del eje frontal del coche. La configuración de la medida puede observarse en la figura 3.

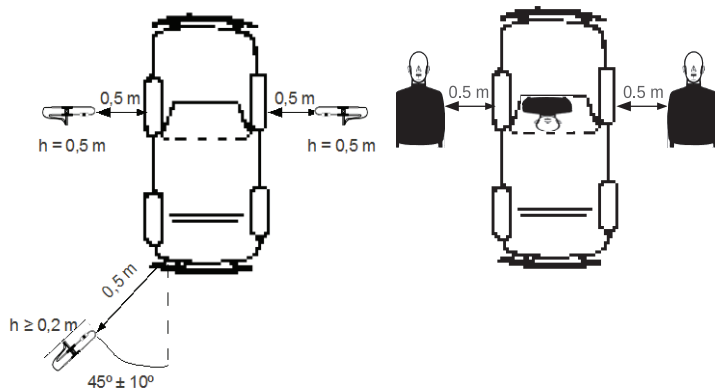


Figura 3. Localización de la sonda de intensidad y el HATS durante el segundo experimento.

Tras la realización de las medidas, y el cálculo de la intensidad selectiva, se ha obtenido la relación entre ambos parámetros para cada posición de la sonda de intensidad y del HATS, observándose los siguientes resultados:

- Cuando el HATS se sitúa en la posición del conductor, para el oído derecho la mayor coherencia se obtiene con la medida de intensidad del eje frontal del lado del conductor, mientras que la menor coherencia se obtiene para el punto de medida de intensidad opuesto. Para el canal izquierdo no es posible establecer una fuente como más o menos coherente porque ésta depende de la banda frecuencial evaluada.
- Para el caso en el que el HATS se sitúa en el eje frontal del coche, en el lado del conductor, la mayor contribución se obtiene para el punto de medida de intensidad situado en la misma localización del HATS para ambos oídos, fruto de la proximidad entre ambas medidas.
- Finalmente, cuando el HATS se sitúa en el eje frontal, en el lado del copiloto, se observa cómo la mayor coherencia para el canal derecho se obtiene con la medida de intensidad localizada en el mismo punto que el HATS, fruto de la proximidad entre ambas medidas. Sin embargo, para el canal izquierdo, la fuente que presenta la mayor o menor coherencia depende de la banda frecuencial evaluada.

### ***Experimento 3: Coherencia entre la intensidad medida en el motor y diferentes posiciones de un HATS.***

En este caso, se pretende observar la influencia del ruido emitido por distintas partes del motor en tres posiciones de un HATS, indicadas en la figura 3. Para ello, se ha definido una matriz de 15 puntos de medida sobre el motor del coche, tal y como puede verse en la figura 4.

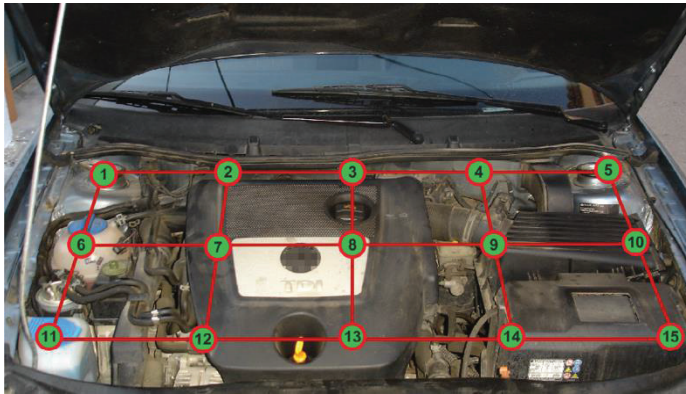


Figura 4. Malla de medida.

Los resultados obtenidos al evaluar la relación entre la intensidad y la intensidad selectiva no revelan, en ninguna de las configuraciones de medida, un punto que presente una mayor coherencia, sino que la misma depende de la banda frecuencial de interés. Además, los resultados para ambos oídos del HATS son similares.

### ***Evaluación de las fuentes sonoras durante el pass-by del coche***

Cuando el coche está en movimiento aparecen nuevas fuentes de ruido que no podemos evaluar en parado, entre ellas podemos destacar el ruido de rodadura, el ruido aerodinámico, etc.

Los métodos estandarizados para la medida del ruido durante el pass-by de un coche sólo dan información de ciertos parámetros como el nivel de presión sonora o el espectro, pero no identifican las fuentes de ruido principales. Los métodos avanzados, identifican las principales fuentes de

ruido durante el pass-by del coche pero presentan problemas a la hora de situar los transductores de medida.

Teniendo en cuenta lo anterior, en (Ballesteros et al., 2014) se describe una nueva metodología para la realización de medidas mediante Beamforming durante el pass-by de un coche, utilizando para ello un array de micrófonos. Para definir esta metodología se han llevado a cabo diversas simulaciones, lo que ha permitido definir el array, el escenario de medida y elegir el algoritmo que mejor se adapta a lo que queremos.

Como resultados de las simulaciones, se eligió el array que aparece en la figura 5, localizado a 5m del coche, y a una altura de 1,5m entre el centro del array y el suelo. Para el procesado de datos se eligió el algoritmo de foco móvil con ciertas modificaciones que permitían la obtención de unos resultados más precisos.

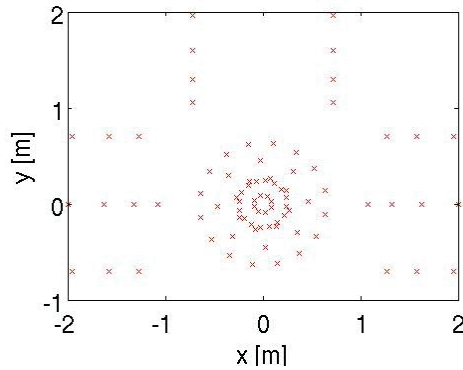


Figura 5. Array para las medidas de pass-by.

El esquema de medida y procesado definido en las simulaciones, se probó en la medida de un coche circulando a 80km/h. Para llevar a cabo la medida, se situaron 2 fotocélulas al inicio y final de la trayectoria del vehículo. Al pasar por la primera fotocélula se activaba una señal de trigger que iniciaba la medida, 5m después de que el coche pasara por la segunda fotocélula, es decir, cuando todo el coche había abandonado la zona de medida, la medida se paraba. Las figuras 6 y 7 muestran el escenario de medida y la realización de las mismas.

Los resultados del estudio mostraron cómo la mayor fuente de ruido se localizaba en la zona de contacto entre la rueda y la carretera (ruido de rodadura), cerca del centro de la pisada y con una mayor emisión de la parte delantera de la rueda que de la trasera (figura 8). Comparando estos



resultados con los mostrados en la literatura mediante el uso de otras técnicas de medidas, se observa que las conclusiones coinciden.

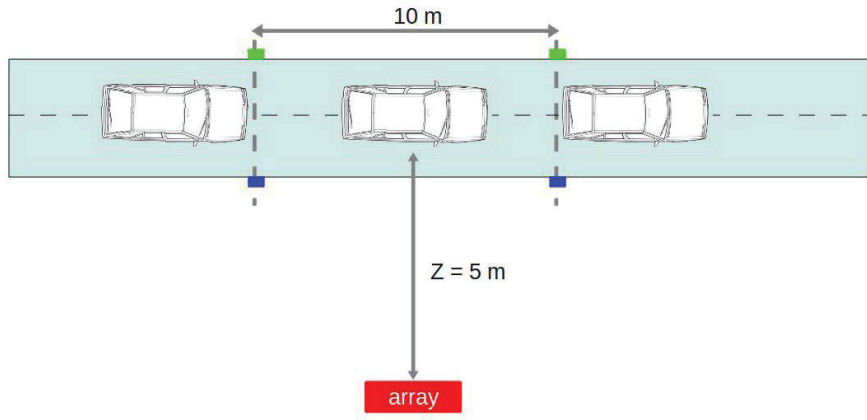


Figura 6. Escenario de medida.



Figura 7. Realización de las medidas de pass-by.

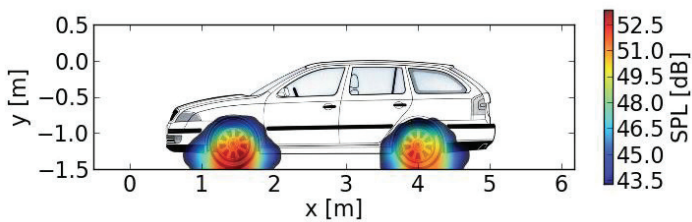


Figura 8. Ejemplo de los resultados obtenidos a 80km/h en la banda de 3150Hz.

Por otro lado, con el fin de evaluar mejor el ruido de rodadura, se definieron unos sectores alrededor de las ruedas, obteniendo, mediante la integración de todas las fuentes presentes, el espectro de esta fuente de ruido.

Los resultados mostraron una tendencia similar en ambas ruedas, compuesta por un pico alrededor de 1kHz y un decrecimiento del nivel de presión sonora a medida que aumenta la frecuencia. Resultados coherentes con otros estudios mostrados en la literatura mediante el uso de otras técnicas de medida.

Una vez definida la metodología de medida, en (Ballesteros, et al., 2015) se realizaron diferentes medidas a velocidad constante utilizando dos coches de gama media, uno diesel y otro gasolina. Las medidas se hicieron desde 30km/h a 80km/h en pasos de 10km/h de derecha a izquierda (el lado del conductor más cerca del array) y de izquierda a derecha (el lado del acompañante más cerca del array). La marcha engranada fue 3ª a 30km/h, 4ª a 40km/h, 5ª a 50km/h y 6ª en el resto de casos. Además se realizaron diferentes medidas a 50km/h engranando desde 2ª a 6ª de derecha a izquierda y de izquierda a derecha.

A partir de los resultados obtenidos para ambos coches, se observó que no había diferencias entre los resultados obtenidos para ambos lados del coche, además, se corroboran los resultados del estudio previo en cuanto a la forma del espectro y la localización de las fuentes de ruido con un mayor nivel.

Por otro lado, se ha observado cómo a 30km/h y 40km/h el nivel de ruido de la rueda delantera es mayor que el de la trasera a partir de entre 1kHz y 1,6kHz, no existiendo diferencias a partir de esta velocidad.

En cuanto a las diferencias cuando se engranan distintas marchas a 50km/h, se observó cómo a partir de la 4ª velocidad, no había diferencias entre los distintos espectros, ya que las r.p.m. del motor son muy bajas y el ruido se genera debido a la interacción entre la rueda y el pavimento. En 3ª velocidad el nivel de presión sonora es mayor y en 2ª se observa el mayor incremento de nivel, esto es debido a que el motor funciona a elevadas r.p.m. y el ruido medido en la rueda delantera aumenta significativamente por la emisión del mismo.

Dado que los resultados obtenidos en los dos coches son similares, todas las medidas se han mezclado, permitiéndonos obtener ecuaciones de predicción del ruido de rodadura en tercios de octava en función de la

velocidad para la rueda delantera y trasera, obteniéndose una elevada correlación entre los datos medidos y los resultados de las ecuaciones.

El número de Strouhal es una magnitud adimensional que describe mecanismos de flujo oscilante. Como el coche viaja a través de un fluido (el aire) se pueden obtener otras ecuaciones dependientes del número de Strouhal, a partir de la frecuencia, la velocidad y la dimensión característica del vehículo. Nuevamente, mezclando todos los datos medidos obtenemos las ecuaciones dependientes del número de Strouhal, que vuelven a arrojar resultados con una alta correlación entre los datos y las ecuaciones.

Este estudio se realizó en colaboración con investigadores de reconocido prestigio de la Brandenburgische Technische Universität de Cottbus, Alemania.

## **Identificación de fuentes sonoras en el sector de la construcción**

En el sector de la construcción se utilizan dos tipos de técnicas de medida para determinar el aislamiento acústico de los paramentos verticales. El primero de ellos, descrito en la norma ISO 140-4, se basa en la realización de medidas de presión sonora, pero no permite identificar las partes del paramento que presentan un menor aislamiento y no permite eliminar las transmisiones indirectas que afectan a la medida. El segundo de ellos, descrito en la norma ISO 15186-2, permite identificar las partes del paramento que presentan un menor aislamiento y eliminar las transmisiones indirecta, pero tiene como contrapartida la necesidad de realizar un elevado número de puntos de medida para tener suficiente resolución en la identificación de dichas partes con menor aislamiento, lo que conlleva un elevado tiempo de medida.

En (Ballesteros et al., 2012) se plantea una nueva metodología de medida basada en Beamforming y SONAH (Holografía de campo cercano optimizada estadísticamente - Statistically Optimized Near Field Holography), la cual presenta las ventajas descritas en las dos técnicas estandarizadas: rapidez y detección de fugas.

El procedimiento de medida descrito define los recintos emisor y receptor de igual forma que en las normas de aislamiento, esto es, el recinto emisor será el más reverberante, y el receptor el más anecoico. Una vez definidos los recintos emisor y receptor, colocaremos una fuente omnidireccional en el recinto emisor, emitiendo ruido blanco debidamente

ecualizado y con un nivel suficiente como para garantizar la relación señal a ruido en el recinto receptor, determinando seguidamente el nivel de presión sonora incidente sobre el paramento bajo ensayo. En el recinto receptor situaremos el array con el que realizaremos las medidas (Figura 9).



Figura 9. Array utilizado.

Dado que Beamforming presenta una mala resolución a baja frecuencia, y SONAH la presenta a alta frecuencia, debemos combinar ambas técnicas para cubrir el rango frecuencial de interés, debiendo realizar una medida a media-larga distancia con Beamforming, la cual cubrirá toda la superficie bajo ensayo, y otra medida con SONAH en campo cercano (10 cm del paramento) focalizando el array en diferentes partes de la superficie bajo ensayo, ya que no es posible cubrir la totalidad de la misma.

Una vez realizadas las medidas, se obtiene el nivel de intensidad resultante con cada una de ellas, y utilizando el mismo procesamiento que en la norma ISO 15186, se determina el aislamiento del paramento o de una parte de éste.

Para comprobar los resultados de la técnica de medida propuesta, se han realizado medidas sobre una pared doble y tres puertas construidas con distintos materiales. La puerta se eligió por ser un elemento separador uniforme, muy conocido y estudiado teórica y experimentalmente, por lo que nos sirve como referencia para probar la técnica. La elección de las puertas viene determinada porque, junto a las ventanas, suelen ser los elementos constructivos que presentan un menor aislamiento. Estas medidas se han realizado tanto con el nuevo método propuesto, como con los métodos estandarizados.

Los resultados obtenidos muestran una correcta identificación de las partes del paramento vertical que presentan un menor aislamiento, tal y como se puede ver en el ejemplo de la figura 10 para la puerta de madera. En el caso de Beamforming el mayor nivel, y por tanto, el menor aislamiento, se localiza en la parte inferior de la puerta, en la que existe bastante separación con el suelo. En el caso de SONAH, el mapa es bastante uniforme al tratarse de una superficie homogénea.

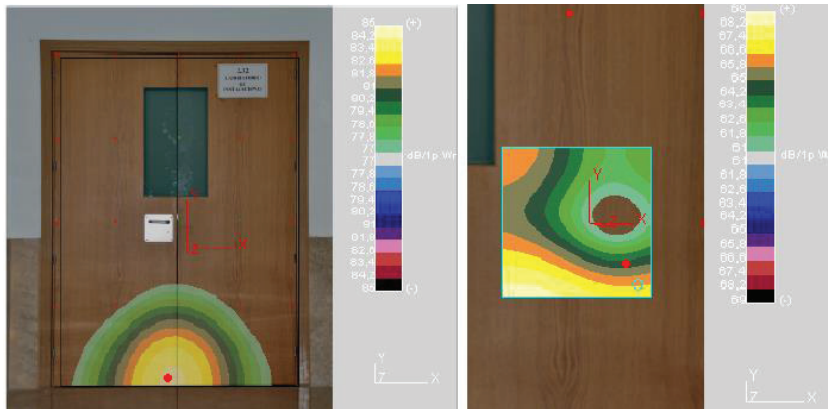


Figura 10. Ejemplo de resultados para la puerta de madera. Izq: Beamforming en el tercio de octava de 500Hz. Dcha: SONAH en el tercio de octava de 250Hz.

En cuanto a la comparación de los resultados de aislamiento obtenidos con los que derivan de las técnicas estandarizadas, se comprobó que la tendencia de la curva de aislamiento acústico es muy similar en todos los casos, no obstante, el valor numérico obtenido presenta ciertas diferencias.

Esta investigación se enmarcó dentro del proyecto regional "Determinación del aislamiento acústico de puertas y mamparas macizas, acústica y resistentes al fuego (JCCM, Ref. PPII10-0172-426)".

## Conclusiones

Tanto en el caso del ruido en automóviles, como en el caso del aislamiento en paramentos verticales, resulta de utilidad conocer las fuentes de ruido que generan el mayor nivel o las partes del paramento que presentan el menor aislamiento. Para este fin, las técnicas de identificación de fuentes de ruido resultan especialmente útiles, tal y como se ha observado en las investigaciones llevadas a cabo.

Para la identificación de las fuentes de ruido en un coche parado a ralentí, se han realizado tres experimentos distintos. En primero ha consistido en la evaluación de la coherencia entre la intensidad medida en tres ejes en el interior del vehículo y cuatro micrófonos de referencia, comprobándose que esta técnica es útil para tener indicios de la contribución de ciertas fuentes a la intensidad medida en cada eje en la posición del conductor, pero no para establecer un nivel de intensidad selectiva. El segundo ha consistido en la evaluación de la coherencia entre las señales de un HATS situado en tres posiciones distintas y tres posiciones de medida de la intensidad sonora, observándose que el procedimiento es suficientemente preciso y útil para observar la influencia de diferentes fuentes sonoras en distintas posiciones de escucha e identificar si ésta influencia es similar para ambos oídos o no. La última técnica ha consistido en evaluar la coherencia entre el ruido emitido por distintas partes del motor del vehículo con el recibido en tres posiciones de medida del HATS, comprobando cómo esta técnica permite identificar la influencia de cada una de las partes del motor en el ruido escuchado por el conductor del vehículo o en el exterior del mismo. Además, el uso del HATS permite no sólo evaluar los resultados en cuanto al nivel de ruido, sino también tener en cuenta el ruido percibido por una persona.

Para la identificación de fuentes de ruido durante el pass-by de un coche, se han realizado una serie de simulaciones que han permitido definir una metodología de medida mediante Beamforming que solventa los problemas de técnicas de medida estandarizadas y avanzadas utilizadas en estudios previos, obteniendo resultados coherentes a los obtenidos con dichas técnicas.

Además, se ha observado cómo a 50km/h el nivel de ruido aumenta engranando 2ª y 3ª, siendo esta emisión independiente de la marcha engranada a partir de 4ª.

La unificación de todos los resultados medidos, ha permitido obtener ecuaciones de predicción basadas en la velocidad y el número de Strouhal con un alto grado de precisión.

En el caso de la identificación de las partes de los paramentos verticales que presentan un menor aislamiento acústico, se ha definido una metodología de medida combinando dos técnicas basadas en array: Beamforming y SONAH.

Estas técnicas permiten una rápida y precisa identificación de aquellas zonas en las que el aislamiento es menor, por lo que pueden utilizarse como una primera medida de control, y en el caso de observarse

problemas de aislamiento, utilizar los métodos estandarizados para cuantificarlos.

## **Bibliografía**

Ballesteros, J.A., Quintana, S., Fernández, M.D., Martínez, L. (2012). Application of Beamforming and SONAH to airborne noise insulation measurements. Berlin Beamforming Conference 2012, Berlín, Alemania.

Ballesteros, J.A., Fernández, M.D., Ballesteros, M.J. (2014). Using selective intensity and a HATS to evaluate noise sources in a car working at idle. Journal of Applied Acoustics. 76 - 1, pp. 1 – 13.

Ballesteros, J.A., Sarradj, E., Fernández, M.D., Geyer, T., Ballesteros, M.J. (2014). Methodology for pass-by measurements on cars with Beamforming. Berlin Beamforming Conference 2014, Berlín, Alemania.

Ballesteros, J.A., Sarradj, E., Fernández, M.D., Geyer, T., Ballesteros, M.J. (2015). Noise source identification with Beamforming in the pass-by of a car. Journal of Applied Acoustics. 93, pp. 106 - 119.

